干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

上游不同开发情景对阿克苏河径流变化影响分析

陈 硕[1,2]， 段伟利[1,2]， 李肖杨[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：萨雷扎兹河发源于吉尔吉斯斯坦（以下称吉国），入境水量约占阿克苏河水量的44.3%，对确保阿克苏地区经济社会的可持续发展具有重要的现实意义。近年来，吉国计划在萨雷扎兹河（阿克苏河上游）进行水资源开发，将会影响处于下游的我国境内阿克苏河流域的水资源量。基于阿克苏河流域的径流数据，定量分析了萨雷扎兹河的径流变化特征和不同开发情景对阿克苏河下游径流的影响。结果表明：在1958—2015年，萨雷扎兹河年径流整体呈显著上升趋势；径流的年内分配差异较大，主要集中在7、8月；春、冬两季径流呈显著增长趋势，夏、秋两季呈微弱增长趋势；从年代际变化看，除1958—1959年为偏枯水时段，1990—1999年为偏丰水时段外，剩下的时间段均为平水时段。吉国跨流域调水工程建设将对阿克苏河径流产生重大影响。从季节尺度分析，跨流域调水工程建设将导致阿克苏河下游径流呈减少状态，其中夏季敏感性最高；从年尺度分析，跨流域调水工程建设将导致阿克苏河下游径流呈减少状态，而且随着调水量的增多，阿克苏河下游径流不断减少。研究结果可以为我国政府在处理吉国跨流域调水工程建设对阿克苏河径流产生影响的问题上提供一定的参考。

关 键 词：径流；开发情景；水利工程；多元线性回归模型；阿克苏河；萨雷扎兹河

文章编号：

水资源是西北干旱区经济社会可持续发展的限制性因素之一。塔里木河流域位于我国新疆南部，气候干燥少雨，且蒸发能力强，是典型的干旱荒漠地区[1]。塔里木河流域是我国最大优质棉生产基地和重要的能源基地，气候变暖加剧流域水资源不确定性[2]，只有保障水资源供给，才能保证流域的可持续发展。阿克苏河地处新疆塔里木盆地西北部，发源于吉尔吉斯斯坦（以下称吉国）境内，由库玛拉克河（吉国境内称为萨雷扎兹河）和托什干河（吉国境内称为阿克塞河）两大支流汇合而成。阿克苏河是唯一一条常年向塔里木河供水的河流，其下泄水量约占塔里木河干流水量的75%，在塔里木河的形成、发展和演化中发挥着重要作用[3]。

在前苏联时期，为解决伊塞克湖流域和楚河流域水资源问题，吉国计划将萨雷扎兹河（阿克苏河上游）的水调入伊塞克湖流域和楚河流域，但由于自然环境和开发条件，该计划未能实施[4]。但是，依据吉国近年来的新闻媒体报道，显示吉国有开发萨雷扎兹河水资源的意向。2013年吉国总统表示中-吉两国（中国和吉尔吉斯斯坦）将签署在萨雷扎兹河建设水电站备忘录①。2014年7月，吉国副总理提出了萨雷扎兹河流域及其邻近地区的开发项目②。如果吉国开发萨雷扎兹河，那吉国将控制阿克苏河境外来水量，减少进入塔里木河的水量，最终对塔里木河流域造成一定的负面影响[4]。因此，研究阿克苏河上游境外水资源开发对下游径流变化的影

收稿日期：2020-11-16； **修订日期：**2021-05-09
基金项目：新疆自治区天山雪松计划（2019XS10）
作者简介：陈硕（1996-），女，硕士，主要从事生态水文研究. E-mail: chenshuo18@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：段伟利（1986-），男，研究员，主要从事生态水文过程研究. E-mail: duanweili@ms.xjb.ac.cn

① http://kg.mofcom.gov.cn/article/qyhz/201306/20130600162582.shtml；来源：驻吉尔吉斯经商参处，2021-05-03访问。

② https://akipress.com/news:544613；来源：AKIpress通讯社，2021-05-03访问。

响，具有很好的科学和现实意义。

水利工程在防洪减灾、水资源合理调度等方面发挥了重大作用，但也对生态系统[5-6]、河流形态与水文状况[7-10]、局地气候[11]等方面造成了一系列影响。目前，国内外学者对阿克苏河流域冰川积雪[12-15]、水循环过程[16]、土地利用[17-18]等方面进行了大量的研究，然而对阿克苏河上游水利工程建设对下游径流影响的研究相对较少。本文依据吉国在萨雷扎兹河的开发计划，设置吉国跨流域调水工程的开发情景，分析吉国跨流域调水工程建设对阿克苏河下游径流的影响。

1　研究区概况

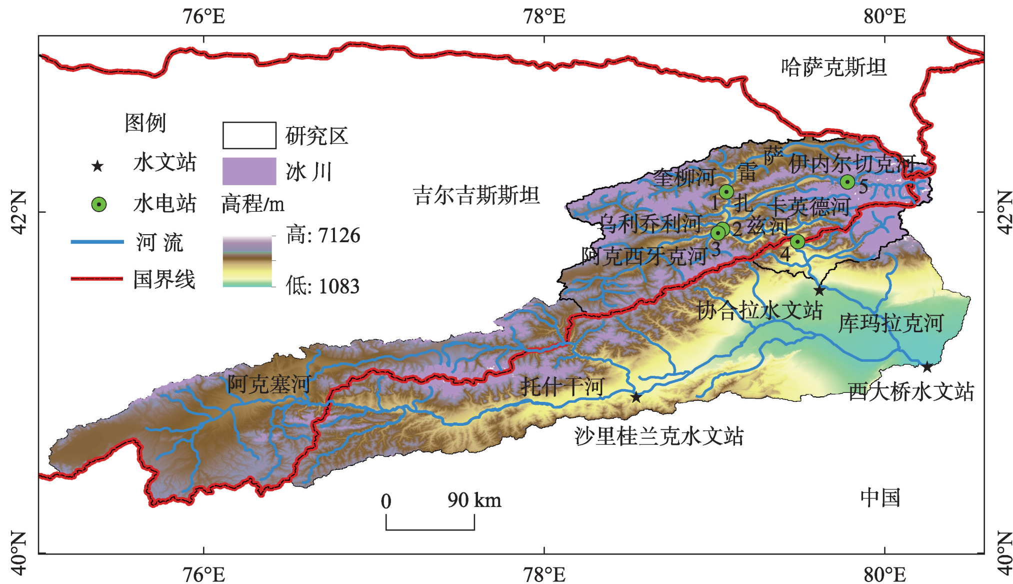
萨雷扎兹河(78°05′~80°17′E，41°22′~42°27′N)发源于天山西段的吉国，是阿克苏河最大的支流[15]。萨雷扎兹河(表1)是冰川融雪补给型河流，干流长度约为242 km，总落差可达1850 m，流域面积约为12887 km²，其中我国境内面积为1906.7 km²，约占流域面积的15%(图1)。流域整体东高西低，平均海拔约3200 m，气候寒冷，气温较低，湿度高，蒸发量少[19]。流域终年积雪，冰川发育广泛，据中亚冰川目录统计，共有1508条冰川，冰川面积约为2421 km²，约占流域面积的19%。

吉国水资源丰富，经济相对落后。据2016年世界银行(World Bank)调查显示，吉国的贫困率高达25.4%，水力发电是该国经济增长的主要动力。据水电力评估，萨雷扎兹河流域水能蕴含量为147.2×10⁴ kW，但因地势复杂、位置密闭和气候恶劣，该流域的水资源基本处于未利用状态。2006年，吉国工业、贸易与旅游副部长宣布在萨雷扎兹河流域建立梯

表1　萨雷扎兹河主要支流的特征参数

Tab. 1　Characteristic parameters of the main tributaries of the Sary-Jaz River

河流	长度/km	流域面积/km²	标准流量/m³·s⁻¹	径流总量/10⁸ m³
奎柳河	50	2800	32.8	3.6
伊内尔切克河	50	1852	11.4	9.8
卡英德河	42	607	31.1	2.4
乌利乔利河	87	1467	7.5	5.5
阿克西牙克河	99	2290	12.3	3.9



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3266号的标准地图制作，底图无修改。图中1~5表示吉国计划建设的5个水电站。下同。

图1　阿克苏河上游流域图

Fig. 1　Sketch map of the upper Aksu River Basin

级水电站[4]，2008年，中-吉两国联合对萨雷扎兹河进行了考察，进一步推动萨雷扎兹河的水资源开发[20]。随后在2013年和2014年，吉国总统和副总理均表示吉国有开发萨雷扎兹河的意向。根据吉国新闻媒体报道，吉国将在萨雷扎兹河建设5个水电站③。一旦水电站建成，吉国有可能再次实施跨流域调水工程，从萨雷扎兹河调水到伊塞克湖流域，以实现水资源的合理调配。因此，本文通过设置跨吉国流域调水工程的开发情景，定量分析吉国跨流域调水工程建设对阿克苏河下游径流的影响。

2　数据与方法

2.1　数据来源

本文收集的数据主要包括阿克苏河流域的数字高程数据、河网水系与主要河流站点数据。具体如下：流域数字高程模型（DEM）来源于由美国太空总署（NASA）和国防部国家测绘局（NIMA）联合测量的SRTM数据，分辨率为90 m（https://srtm.csi.cgiar.org）。流域边界和河网水系数据来源于美国地质调查局（USGS）的HydroSHEDS网站（http:// hydrosheds.cr.usgs.gov）。主要河流站点数据是阿克苏河两条支流出山口的协合拉、沙里桂兰克水文站和两条支流汇合处西大桥水文站的逐月实测径流数据（表2）。由于缺乏萨雷扎兹河的径流资料，且该流域水资源基本处于未利用状态，本文以位于库玛拉克河的协合拉水文站的径流数据作为萨雷扎兹河的径流数据。

2.2　研究方法

2.2.1　Mann-Kendall检验法　Mann-Kendall检验法是一种非参数检验方法，用来评估数据的长时间序列变化趋势，该方法具有受异常值的干扰小、适用范围广等优点[21]。基于上述优点，本文采用该方法分析1958—2015年萨雷扎兹河的径流变化特征。

2.2.2　多元线性回归模型　阿克苏河的河流组成显示，位于吉国的萨雷扎兹河和阿克塞河的入境水量与阿克苏河干流之间具有较强的相关性。本文通过建立阿克苏河两条支流与干流的多元线性回归模型，分析萨雷扎兹河入境水量变化对阿克苏河下游径流的影响。

资料显示，吉国并未有开发阿克塞河的意向，因此假设阿克塞河的入境水量基本不变。基于协合拉、沙里桂兰克以及西大桥水文站的径流数据构建多元线性回归模型。模型如下：

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \varepsilon \tag{1}$$

式中：Y 是多元线性回归模型的因变量，表示西大桥水文站的径流量（$10^8\ m^3$）；X_1 和 X_2 是多元线性回归模型的自变量，分别代表沙里桂兰克和协合拉水文站的径流量（$10^8\ m^3$）；b_0 是多元线性回归模型的常数项；b_1、b_2是相应水文站的回归系数；ε 为未知因素对因变量的影响变量。

3　不同开发情景的设置及对下游的影响

3.1　不同开发情景的设置

前苏联时期，吉国就计划从萨雷扎兹河调水到伊塞克湖流域和楚河流域，以解决伊塞克湖流域和楚河流域严重的缺水问题，以实现水资源的合理调配，但因自然条件恶劣和技术落后，该计划未能实施[21]。如果该流域水电开发成功，那么吉国极有可能进行跨流域调水工程建设，从萨雷扎兹河流域调水到伊塞克湖流域（图2）。同时，流域内居民的生产生活和因水电开发成功兴起的经济活动，如矿产资源的开采，也会消耗大量的水资源。前苏联时期，计划调水量为$16\times10^8\ m^3$[4]，约占萨雷扎兹河多年

表2　阿克苏河流域主要水文站点基本信息

Tab. 2　Basic information of major hydrological stations in the Aksu River Basin

水文站	河名	位置	集水面积/km²	多年平均流量/m³·s⁻¹	资料年限
协合拉	库玛拉克河（萨雷扎兹河）	79°37′E，41°34′N	12887.30	153.44	1958—2015年
沙里桂兰克	托什干河（阿克塞河）	78°32′E，40°56′N	19335.51	89.04	1958—2015年
西大桥	阿克苏河	80°15′E，41°56′N	45025.29	199.82	1958—2015年

③ https://24.kg/archive/ru/politic/3870-2006/07/06/4161.html；来源：24.kg通讯社，2021-05-03访问。https://rg.ru/2013/07/03/ges.html；来源：RG.UR网站，2021-05-03访问。

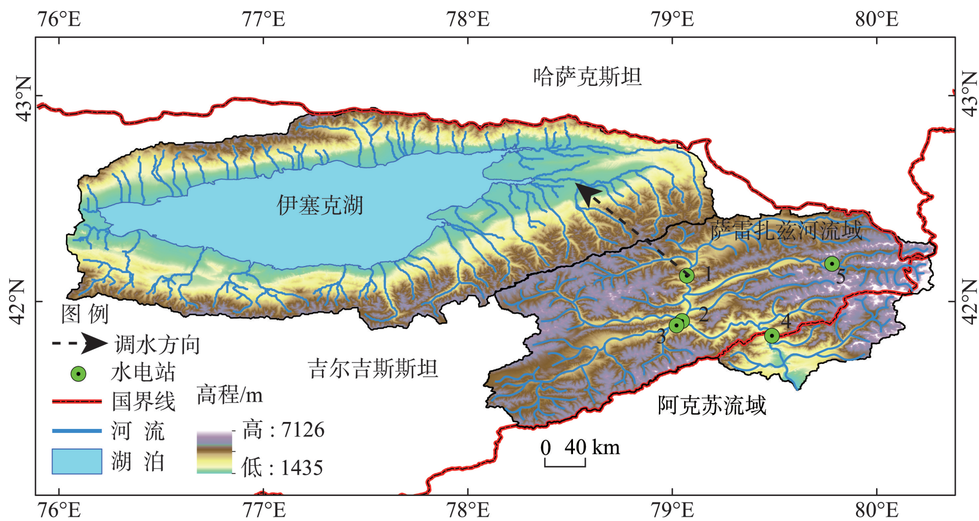


图2 可能拟调水路线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water diversion route may be proposed

平均径流量(48.42×10^8 m^3)的30%,并考虑中-吉两国在跨界河流的合作,所以将跨流域调水工程建设导致入境水量减少30%作为调水量的上限。因此,将萨雷扎兹河流域调水到伊塞克湖流域会导致入境水量减少为前提,以吉国跨流域调水工程会导致入境水量减少10%、15%、20%、25%、30%作为敏感度分析的假设条件,从不同的时间尺度定量分析吉国跨流域调水工程建设对阿克苏河下游径流变化的影响。

3.2 萨雷扎兹河水资源开发对下游造成的潜在影响

近年来,随着南疆地区经济发展、人口增多和灌溉面积扩张,水资源需求也日益增加,流域上下游之间的水资源利用矛盾日益突出。萨雷扎兹河作为阿克苏河的一条支流,为阿克苏河提供了约44.3%的水量[22]。虽然气候变暖导致萨雷扎兹河的径流量有所增加,但阿克苏河流域内的农业灌溉也消耗了大量水资源,增加了水资源压力[22]。特别是在每年的4、5月,正值灌区春灌用水多的时期,如果吉国对萨雷扎兹河进行跨流域调水,会使阿克苏河下游流域的水资源供需矛盾加剧。不仅如此,一旦遇上枯水年,阿克苏河下游流域水资源供需矛盾可能会进一步重激化[23],不仅影响流域内的社会经济发展,甚至会导致塔里木河出现断流现象。

4 结果与分析

4.1 萨雷扎兹河的径流变化

1958—2015年,萨雷扎兹河年径流量呈显著上升趋势(P<0.01),年平均径流量为48.42×10^8 m^3,径流量最高值和最低值分别出现在1997、1972年,两者相差33.6×10^8 m^3(图3)。萨雷扎兹河的年内径流分配差异较大,主要集中在7、8月,约占全年流量的

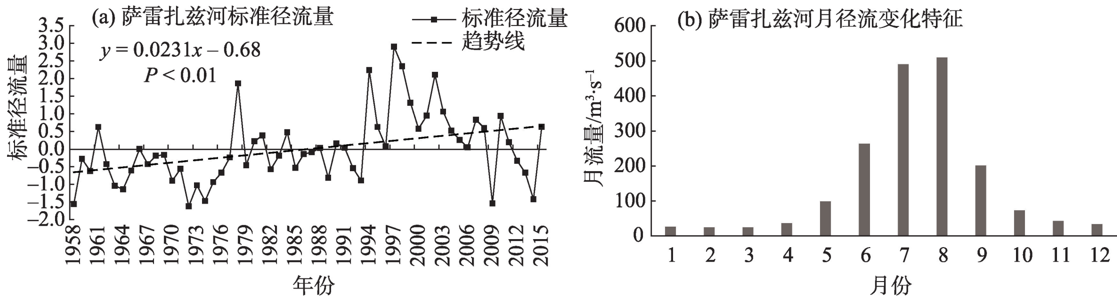


图3 萨雷扎兹河年际及月径流变化特征

Fig. 3 Characteristics of annual and monthly runoff changes in Sary-Jaz River

54.06%，径流最少的3个月为1、2、3月，约占全年流量的4.43%，年内径流的最高值出现在8月，最低值出现在3月，两者相差479.94 $m^3 \cdot s^{-1}$。

1958—2015年，春、冬两季平均径流量呈显著增长趋势，增速分别为0.014×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$和0.008×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$，其中冬季的径流占比最低；夏、秋两季平均径流量呈不显著增长趋势，增速分别为0.114×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$和0.020×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$，其中夏季的径流占比最高，这主要是由于降雨集中在夏季，且夏季气温较高有利于冰川积雪的融化(表3)。

萨雷扎兹河径流的年代际变化特征(表4)，1958—1959年为偏枯水时段，1990—1999年为偏丰水时段，其余时段均为平水时段。从平水时段看，1970—1979年平均径流量最小为43.96×10^8 m^3，2000—2009年平均径流量最大为52.46×10^8 m^3，可能是因为2000—2009年的降水量较多。

4.2 跨流域调水工程建设对阿克苏河下游径流变化的影响

4.2.1 不同时间尺度的多元线性回归模型 基于1958—2015年的协合拉、沙里桂兰克和西大桥3个水文站的月径流数据，经过多元线性回归模型的分析，得到不同时间尺度的多元线性回归方程(表5)，并运用F检验法验证拟合效果。结果表明，所有多元线性方程均通过显著性检验(P<0.05)，说明萨雷扎兹河、阿克塞河入境水量与阿克苏河干流水量的多元线性模型的整体拟合程度较好。

4.2.2 阿克苏河径流变化的敏感度分析 以吉国跨流域调水工程建设导致萨雷扎兹河入境水量减少

表3 1958—2015年萨雷扎兹河径流的季节变化特征

Tab. 3 Seasonal variation of runoff in Sary-Jaz River from 1958 to 2015

季节	时间序列	平均径流量/10^8 m^3	斜率	占年径流量的比例/%
春季(3—5月)	1958—2015年	4.37	0.014*	9.01
夏季(6—8月)	1958—2015年	33.47	0.114	69.05
秋季(9—11月)	1958—2015年	8.55	0.020	17.43
冬季(12—2月)	1958—2015年	2.39	0.008**	4.51

注：*表示通过α=0.05显著性检验；**表示通过α=0.01显著性检验。

表4 1958—2015年萨雷扎兹河径流的年代际变化特征

Tab. 4 Interdecadal variation of runoff in Sary-Jaz River from 1958 to 2015

时段	平均径流/10^8 m^3	距平百分比/%	丰枯判别	径流最大年		径流最小年	
				径流量/10^8 m^3	年份	径流量/10^8 m^3	年份
1958—1959年	41.59	-14	偏枯水	46.35	1959	36.84	1958
1960—1969年	45.47	-6	平水	53.08	1961	39.97	1964
1970—1979年	43.96	-9	平水	62.24	1978	36.37	1972
1980—1989年	47.52	-2	平水	51.95	1984	42.38	1989
1990—1999年	54.56	13	偏丰水	69.96	1997	41.83	1993
2000—2009年	52.46	8	平水	64.07	2002	36.98	2009
2010—2015年	47.61	-2	平水	55.38	2010	37.87	2014
多年平均径流	48.42	—	—	—	—	—	—

表5 萨雷扎兹河、阿克塞河和阿克苏河下游径流量的多元线性回归方程

Tab. 5 Multiple linear regression equations of the runoff in Sary-Jaz, Aksai and Aksu Rivers

尺度	方程	R^2	F值	P值
春季	Y=0.386+0.368X_1+0.882X_2	0.591	39.676	0.000
夏季	Y=-6.575+0.675X_1+0.990X_2	0.779	97.106	0.000
秋季	Y=1.004+0.897X_1+0.853X_2	0.654	51.882	0.000
冬季	Y=8.274-1.418X_1+0.222X_2	0.192	6.538	0.003
年	Y=-2.549+0.783X_1+0.897X_2	0.778	96.499	0.000

注：Y表示西大桥水文站的径流量(10^8 m^3)；X_1表示沙里桂兰克水文站的径流量(10^8 m^3)；X_2表示协合拉水文站的径流量(10^8 m^3)。

10%、15%、20%、25%、30%作为调水工程的开发情景,以托什干河(阿克塞河)的径流量基本不变为前提,对阿克苏河下游的径流量变化进行计算(表6)。从季节尺度分析,吉国跨流域调水工程建设导致阿克苏河下游径流量呈减少的状态,其中夏季最为敏感,当萨雷扎兹河入境水量减少30%时,阿克苏河下游径流量减少量最大(26.36%);冬季敏感度最低,当萨雷扎兹河入境水量减少10%时,阿克苏河下游径流量减少仅0.77%。从年尺度分析,吉国跨流域调水工程建设导致阿克苏河下游径流量呈减少状态,其中萨雷扎兹河入境水量减少10%时,阿克苏河下游径流量减少6.89%;当萨雷扎兹河入境水量减少30%时,阿克苏河下游径流量减少20.72%,而且随着调水量的增多,阿克苏河下游径流不断减少。

5 讨论

1958—2015年,萨雷扎兹河径流的年际变化呈显著增长趋势;春、冬两季平均径流量呈显著增长趋势,夏、秋两季平均径流量则呈不显著增长趋势。在过去的几十年里,萨雷扎兹河流域的径流总体呈上升趋势,引起这一现象的主要原因可能是气候变暖加剧了阿克苏河上游流域冰川积雪融化。Li等[24]指出气温对阿克苏河流域径流升高的贡献率可高达45%,陈亚宁等[25]指出气候变化是导致以冰川融水补给为主的河川径流增加的原因。从近期看,萨雷扎兹河径流的增加有助于缓解阿克苏河下游流域的工业、农业和生态用水之间的矛盾。但从长远来看,气候变暖导致水资源储量减少,河流流量总体会出现下降趋势[25],将加剧阿克苏河流域用水矛盾。

经F检验多元线性回归模型通过显著性检验($P<0.05$),说明该模型在阿克苏河上游流域的模拟效果较好,研究结果与张恒[19]的研究结果具有一致性。从季节和年尺度分析,吉国调水工程建设将导致阿克苏河下游径流量呈减少状态。吉国跨流域调水工程建成后,不同的调水情景对阿克苏下游径流产生了不同程度的负面影响。特别是春季和夏季,此时正值农业灌溉时期,农业需水量大,吉国跨流域调水工程建设导致阿克苏河下游径流的减少量相对较大,这将增加流域的水资源压力,可能无法保障阿克苏河流域和塔里木河流域的用水安全,特别是在枯水年份,可能对流域的生态环境造成不可逆转的损害。

最后,本文的研究结果也存在一些局限性和不确定性。因为缺乏萨雷扎兹河流域的径流数据,所以本文以位于库玛拉克河的协合拉水文站的径流数据作为萨雷扎兹河的径流数据,研究结果可能会与实际情况之间存在一定的误差,从而影响研究结果的精确度。本文采用简单的线性方法对萨雷扎兹河与阿克苏河干流的径流量进行了模拟,同时假设托什干河的径流系数(b_1)不变,在一定程度上会存在误差。因此,在未来的研究中可以结合研究区域的特征,采用水文模型进行更深入的研究。

6 结论

本文基于阿克苏河流域的径流数据,定量分析了萨雷扎兹河的径流变化特征和不同开发情景对阿克苏河下游径流的影响,得到如下结论:

(1) 1958—2015年,萨雷扎兹河年径流量呈显著上升趋势,增速为$0.0231\times10^8\ m^3\cdot a^{-1}$;径流的年内分配差异较大,主要集中在7、8月;春、冬两季平均径流量均呈显著增长趋势,夏、秋两季平均径流量则呈不显著增长趋势。从径流的年代际变化看,除

表6 年和季节尺度下阿克苏河下游径流量对萨雷扎兹河入境水量变化的敏感度分析

Tab. 6 Sensitivity analysis of runoff in lower Aksu River on annual and seasonal scale to the Sary-Jaz River runoff reduction

萨雷扎兹河入境水量减少量/%	阿克苏河下游径流量变化/%				
	春季	夏季	秋季	冬季	年
10	−6.25	−8.81	−5.75	−0.77	−6.89
15	−9.35	−13.20	−8.65	−1.16	−10.35
20	−12.44	−17.59	−11.54	−1.56	−13.81
25	−15.54	−21.97	−14.44	−1.95	−17.26
30	−18.64	−26.36	−17.34	−2.34	−20.72

1958—1959年为偏枯水时段,1990—1999年为偏丰水时段外,剩下的时间段均为平水时段。

（2）吉国跨流域调水工程建设将对阿克苏河径流产生一定的负面影响。从季节尺度分析,吉国调水工程建设将导致阿克苏河下游径流量呈减少状态,其中夏季的敏感性最高,下降幅度最大,当萨雷扎兹河入境水量减少30%时,阿克苏河下游径流量减少量最大(26.36%);冬季的敏感性最低,下降幅度最小,当萨雷扎兹河入境水量减少10%时,阿克苏河下游径流量减少仅0.77%;从年尺度分析,吉国跨流域调水工程建设将导致阿克苏河下游年径流量呈减少状态,而且随着调水量的增加,阿克苏河下游径流量不断减少。

参考文献(References)

[1] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 415-424. [Sun Tianyao, Li Xuemei, Xu Min, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 415-424.]

[2] 冯克鹏, 田军仓, 沈晖. 基于K-means聚类分区的西北地区近半个世纪气温变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1239-1252. [Feng Kepeng, Tian Juncang, Shen Hui. Temperature variation characteristics of northwest China based on K-means clustering partition in the past half century[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1239-1252.]

[3] 王国亚, 沈永平, 苏宏超, 等. 1956—2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 562-568. [Wang Guoya, Shen Yongping, Su Hongchao, et al. Runoff changes in Aksu River Basin during 1956—2006 and their impacts on water availability for Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4): 562-568.]

[4] 郭利丹, 夏自强, 周海炜, 等. 阿克苏河境外水利工程开发对我国的潜在影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 128-132. [Guo Lidan, Xia Ziqiang, Zhou Haiwei, et al. Potential impacts of overseas hydraulic engineering development on the Aksu River Basin in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(11): 128-132.]

[5] Wang Y, Lei X, Wen X, et al. Effects of damming and climatic change on the eco-hydrological system: A case study in the Yalong River, southwest China[J]. Ecological Indicators, 2019, 105: 663-674.

[6] Intralawan A, Wood D, Frankel R, et al. Tradeoff analysis between electricity generation and ecosystem services in the Lower Mekong Basin[J]. Ecosystem Services, 2018, 30: 27-35.

[7] Han Z, Long D, Fang Y, et al. Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 96-105.

[8] Wang Y, Wang D, Lewis Q W, et al. A framework to assess the cumulative impacts of dams on hydrological regime: A case study of the Yangtze River[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(17): 3045-3055.

[9] Duan W, Zou S, Chen Y, et al. Sustainable water management for cross-border resources: The Balkhash Lake Basin of Central Asia, 1931—2015[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121614.

[10] Duan W, Chen Y, Zou S, et al. Managing the water-climate-food nexus for sustainable development in Turkmenistan[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 212-224.

[11] Song J, Ma L, Her Y, et al. Immediate influences of a large dam construction on local storm event patterns and weather variables: A case study of the Three Gorges Project[J]. Weather, 2020, 75(3): 99-103.

[12] Li Z, Shi X, Tang Q, et al. Partitioning the contributions of glacier melt and precipitation to the 1971—2010 runoff increases in a headwater basin of the Tarim River[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124579.

[13] Zhang Q, Chen Y, Li Z, et al. Glacier changes from 1975 to 2016 in the Aksu River Basin, central Tianshan Mountains[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(6): 984-1000.

[14] 穆振侠, 姜卉芳. 新疆阿克苏河流域昆马力克河积雪消融规律对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1284-1292. [Mu Zhenxia, Jiang Huifang. The response of snow cover ablation to climate change in the Kumalik River Basin, southern Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1284-1292.]

[15] 沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 1957—2006年天山萨雷扎兹库玛拉克河流域冰川物质平衡变化及其对河流水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 792-800. [Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, et al. Changes in glacier mass balance in watershed of Sary Jaz-Kumarik Rivers of Tianshan Mountains in 1957—2006 and their impact on water resources and trend to end of the 21th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5): 792-800.]

[16] 王志成, 方功焕, 张辉, 等. 基于高空与地面观测的阿克苏河流域气候水文要素变化分析[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 1-10. [Wang Zhicheng, Fang Gonghuan, Zhang Hui, et al. Analysis of hydrometeorological variations based on the sounding and near-surface observations in Aksu River Basin[J]. Climate Change Research, 2018, 14(1): 1-10.]

[17] 汪洋, 安沙舟. 干旱区内陆河流域典型灌区土地利用变化与耗水量研究[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(2): 362-370. [Wang Yang, An Shazhou. Research on land use/cover change and water consumption in typical irrigation areas of inland river basin in arid region[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(2): 362-370.]

[18] Meng F, Liu T, Wang H, et al. An alternative approach to overcome the limitation of HRUs in analyzing hydrological processes based on land use/cover change[J]. Water, 2018, 10(4): 434.

[19] 张恒. 阿克苏河上游水资源变化及其对下游地区生态环境和社会经济的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014. [Zhang Heng. The change of water resources from upper stream Aksu River and its ecoenvironmental & socioeconomic impacts on the downstream area[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.]

[20] 苏宏超. 中-吉首次开展萨雷扎兹河和麦兹巴赫湖联合科考活动[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 867. [Su Hongchao. China and Kyrgyzstan conduct joint scientific research activities on the Sary-Jaz River and Merzbacher Lake[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 867.]

[21] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1): 254-271.

[22] 王志成, 蒋军新, 方功焕, 等. 水资源约束下的阿克苏河流域适宜绿洲规模分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 986-992. [Wang Zhicheng, Jiang Junxin, Fang Gonghuan, et al. Analysis on the suitable scale of the Aksu Oasis under the limit of water resources [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 986-992.]

[23] 郭宏伟, 徐海量, 凌红波. 塔里木河流域枯水年生态调水方式及生态补偿研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1705-1717. [Guo Hongwei, Xiu Hailiang, Ling Hongbo. Study of ecological water transfer mode and ecological compensation scheme of the Tarim River Basin in dry years[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(10): 1705-1717.]

[24] Li B, Chen Y, Xiong H. Quantitatively evaluating the effects of climate factors on runoff change for Aksu River in northwestern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(1): 97-105.

[25] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

Runoff changes of the Aksu River under different exploitation scenarios in the upper river

CHEN Shuo[1,2], DUAN Weili[1,2], LI Xiaoyang[1,2]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Sary-Jaz River originates in Kyrgyzstan, and its water inflow accounts for about 44.3% of the total water resources of the Aksu River, which is very useful for sustainable economic and social development of the Aksu River Basin. In recent years, Kyrgyzstan has planned to build an interbasin water transfer project in the Sary-Jaz River Basin (upstream of the Aksu River), affecting the water resources of the Aksu River Basin. In this paper, we present a quantitative analysis of the runoff trend of the Sary-Jaz River Basin based on the data from hydrological stations in the Aksu River Basin and investigate the impacts of water resources on the lower Aksu River under various development scenarios. Based on the results from 1958 to 2015, the annual runoff of the Sary-Jaz River exhibited a significant increase. There was also a big difference in the annual runoff, mainly concentrated in July and August. Seasonal runoff tended to increase significantly in spring and winter, with a slight increase in summer and autumn. Among the decades of change, 1958 to 1959 were relatively low water levels, 1990 to 1999 were relatively high water levels, and the rest were normal water periods. Therefore, the Kyrgyzstan interbasin water transfer project will significantly impact the Aksu River runoff in the future. Based on a seasonal analysis, the interbasin water transfer project will substantially impact the Aksu River runoff, directly reducing the lower Aksu River runoff. Based on an annual analysis, the interbasin water transfer project will directly reduce the lower Aksu River runoff. Also, as water transfer increases, the runoff of the Aksu River Basin will continue to decline. The results obtained from this study can provide a reference for the Chinese government to address the adverse impacts of the interbasin water transfer project on the Aksu River runoff.

Key words: runoff; the exploitation scenarios; hydraulic engineering; multiple linear regression model; Aksu River; Sary-Jaz River